

SANAYİ TESİSİNDE ÇATI TİPİ GÜNEŞ ENERJİSİ SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ: BURSA ÖRNEĞİ

Melike YALILI KILIÇ^{*1} 

Merve KURTARAN¹ 

Alınma: 28.08.2025 ; düzeltme: 03.11.2025 ; kabul: 30.12.2025

Öz: Günümüzde dünya genelinde hız kazanan nüfus artışı, sanayileşme ve kentleşme süreçleri, enerji talebinde sürekli bir yükselişe neden olmaktadır. Buna karşılık, fosil yakıt temelli enerji üretiminin çevresel etkileri, iklim değişikliği, hava kirliliği ve kaynakların tükenme riski gibi sorunları beraberinde getirmekte; bu durum özellikle güneş enerjisi gibi yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Bu çalışmada, Bursa'nın Osmangazi ilçesinde tekstil kimyasalları üretimi yapan bir tesisin elektrik ihtiyacının güneş enerjisi yoluyla karşılanabilirliği değerlendirilmiştir. Fotovoltaik (PV) sistemin tasarımı ve performans analizi, PVsyst simülasyon programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistem 125 kWp kurulu güce sahip çatı tipi bir güneş enerjisi santrali olarak modellenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, yıllık yaklaşık 164,57 MWh elektrik üretimi sağlanabileceği ve sistemin performans oranının ortalama %86,45 olduğu belirlenmiştir. Özellikle Mart ayında %89,4'e ulaşan performans oranı, sistemin uygun koşullarda oldukça verimli çalışabildiğini göstermektedir. Ayrıca, sistemin kurulması ile proje ömrü boyunca yaklaşık 1.872 ton CO₂ eşdeğeri sera gazı emisyonunun önlenileceği anlaşılmıştır. Sonuçlar, çatı tipi fotovoltaik sistemlerin sanayi kuruluşlarında uygulanabilirliğini ve etkinliğini ortaya koymakta, enerji maliyetlerinin azaltılması ve çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması açısından önemli katkılar sağlamaktadır.

Anahtar kelimeler: CO₂ emisyonu, Çatı tipi fotovoltaik sistem, Performans analizi, PVsyst, Simülasyon

Performance Analysis of a Rooftop Solar Power System in an Industrial Facility: Bursa Case Study

Abstract: The accelerating global growth in population, industrialization, and urbanization is leading to a continuous increase in energy demand. In contrast, fossil fuel-based energy production causes various environmental problems such as climate change, air pollution, and resource depletion, which necessitate the adoption of renewable and sustainable energy sources. This study evaluates the feasibility of meeting the electricity demand of a textile chemical manufacturing facility located in the Osmangazi district of Bursa, Türkiye, through a rooftop photovoltaic (PV) solar energy system. The system design and performance analysis were conducted using PVsyst simulation software. The system was modeled as a rooftop solar power plant with an installed capacity of 125 kWp. According to the simulation results, the system is expected to generate approximately 164.57 MWh of electricity annually, with an average performance ratio of 86.45%. In particular, the highest monthly performance ratio of 89.4% was recorded in March, indicating the system's remarkable efficiency under favorable conditions. Moreover, the system is projected to prevent the emission of approximately 1,872 tons of CO₂ equivalent greenhouse gases over its lifetime. The results demonstrate the technical and environmental feasibility of such systems, highlighting their potential for reducing energy costs and supporting environmental sustainability. Unlike

* Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 16059, Nilüfer/Bursa
İletişim Yazarı: Melike YALILI KILIÇ (myalili@uludag.edu.tr)

similar studies, this work focuses specifically on the PV system performance in a medium-scale industrial facility under the solar irradiation conditions of Bursa, providing valuable localized insights for regional applications.

Keywords: CO₂ emissions, Rooftop photovoltaic system, Performance analysis, PVsyst, Simulation

1. GİRİŞ

Dünyada yaşanan nüfus artışı, teknolojik gelişmeler ve sanayileşme enerjiye olan talebin artmasına neden olmaktadır. Enerji üretiminde fosil yakıtların ön planda olması, çevresel sürdürülebilirlik açısından çok ciddi sorunlar meydana getirmektedir. Fosil yakıt tüketimi, sera gazı emisyonlarının artışına neden olarak, küresel ısınma ile birlikte iklim değişikliğini hızlandırmaktadır (IEA, 2022). Bu durum ülkeleri alternatif ve çevre dostu enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları içinde, kolay erişilebilirliği, düşük çevresel etkisi ve tükenmez oluşu ile güneş enerjisi ön plana çıkmaktadır (Jacobson, 2020).

Güneş enerjisi, fotovoltaik (PV) paneller ile doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. PV sistemlerde, güneş ışığının yarı iletken malzemeler üzerinde oluşturduğu elektriksel etkileşimler sonucunda enerji üretimi gerçekleştirilmektedir (Green, 1982). Son yıllardaki teknolojik gelişmeler, güneş panellerinin enerji dönüşüm verimliliğini arttırmış ve üretim maliyetlerini önemli düzeyde düşürmüştür. Fotovoltaik hücrelerin verimlilik oranları 1980'li yıllarda %10 iken, günümüzde ticari ölçekli panellerde %20'nin üzerine çıkmış ve laboratuvar ortamında %40'a kadar ulaşmıştır (Fraunhofer ISE, 2023). Bu gelişmeler, güneş panellerinin bireysel ve endüstriyel kullanımını yaygınlaştırarak enerji arz güvenliğini sağlamada önemli bir alternatif haline getirmiştir (Lewis ve Nocera, 2006).

Coğrafi konumu gereği Türkiye, güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan ülkeler arasındadır. Türkiye'nin yıllık ortalama güneşlenme süresi 2.737 saat, günlük ortalama güneş radyasyonu 3,6 kWsa/m² ile 7,2 kWsa/m² arasında değişmektedir (EİGM, 2023). Özellikle Konya, Şanlıurfa ve Gaziantep gibi şehirlerde güneş santralleri kurulmakta ve güneş panelleriyle elektrik üretimi yaygınlaşmaktadır. Güneş enerjisi kurulu gücü bakımından Konya ülkemizde ilk sırada yer almakta olup, Seydişehir ilçesinde 1,1 MWp gücünde arazi tipi güneş enerjisi santrali kurulmuştur. Benzer şekilde Gaziantep'in Şehitkamil ilçesinde de 5.910 kWp gücünde bir çatı tipi güneş enerjisi santrali kurulmuştur (CW Enerji, 2025). Ayrıca, Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği'nin 2013 yılında yürürlüğe girmesiyle birlikte, bireysel ve ticari işletmelerin güneş enerjisini kullanma oranı artmış, tarım ve sanayi sektörlerinde bu enerji kaynağı daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır (TEİAŞ, 2022). 2022 yılında yapılan mevzuat güncellemeleriyle birlikte, sanayi tesislerinin çatılarına lisanssız elektrik üretim tesisleri kurmaları kolaylaştırılmış ve sanayide GES uygulamaları hız kazanmıştır (EPDK, 2022).

Güneş enerjisinin elektrik üretiminde kullanımının yaygınlaşması, ekonomik ve çevresel açılardan birçok avantaj sunmaktadır. Öncelikle, güneş panelleri fosil yakıtlı enerji santrallerine kıyasla çok daha düşük karbon salınımına sahiptir ve böylece iklim değişikliği ile mücadelede kritik bir rol üstlenmektedir (IPCC, 2021). Ayrıca, güneş enerjisi üretimi, merkezi şebekelere bağlı kalmaksızın bireysel enerji bağımsızlığını mümkün kılmakta, bu da özellikle enerji arz güvenliği düşük bölgeler için büyük bir fırsat oluşturmaktadır.

Bu kapsamda, pek çok ülke güneş enerjisinin kullanımının yaygınlaşması için teşvikler sağlamaktadır. Almanya, Energiewende politikası ile yenilenebilir enerjiye geçişi hızlandırmış ve 2020 yılı ile birlikte ülkenin elektrik ihtiyacının %10'undan fazlası güneş panelleri ile karşılanmıştır (Wirth, 2022). Çin, güneş paneli üretimi ve büyük ölçekli PV santrallerin kurulmasında küresel lider konumundadır; şehir düzeyindeki PV sistem dağılım modelleri, bu liderliğin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkısını açık şekilde ortaya koymaktadır (Li ve ark., 2024). ABD'de, National Renewable Energy Laboratory (NREL) tarafından yürütülen araştırmalarda, güneş panellerinin verimliliği %30'un üzerine çıkarken, teşvikler ve eyalet politikaları güneş enerjisinin yaygınlaşmasını hızlandırmaktadır (DOE, 2023). Hindistan, Mart

2025 itibarıyla 220,10 GW yenilenebilir enerji kapasitesine ulaşarak 2030 hedefi olan 500 GW fosilsiz enerji kapasitesine doğru sağlam bir ilerleme kaydetmiştir (PIB, 2025).

Literatür araştırmalarında güneşten enerji üretimi üzerine pek çok çalışmanın olduğu, ancak PVsyst programı kullanılarak Bursa ilinde çatı tipi GES uygulamalarına yönelik PVSyst tabanlı çalışmaların sınırlı olduğu görülmüştür. Keskin (2012) tarafından Türkiye'nin farklı bölgelerinden seçilen 7 şehirde fotovoltaik güç sistemlerinin tasarımı ve maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Modellemede PVsyst programı kullanılmış olup, fotovoltaik sistemde en yüksek verim tek kristal teknolojiye sahip modülde elde edilmiştir. İstanbul Teknik Üniversitesi'nde bir fakülte binasının elektrik ihtiyacı için mikro şebeke tasarımı PVsyst ve HOMER programları ile simüle edilmiştir. Çalışmanın sonunda, panellerin toplam kurulu gücü 100 kW, PVsyst simülasyon sonuçlarına göre sistemin yıllık enerji üretimi 120.000 kWh olarak belirlenmiştir. Amortisman süresi 8 yıl olarak hesaplanan çalışmada, sistemin işletilmesiyle yılda 60 ton CO₂ emisyonunun azaltılacağı öngörülmüştür (Çetinkaya ve ark., 2022). Ankara'da kurulu olan şebekeye bağlı 1 MW'lık bir güneş enerji santralinin PVsyst ile simülasyonunun yapıldığı ve performans parametrelerinin değerlendirildiği çalışmada, santralin günlük ve yıllık enerji üretim potansiyeli belirlenmiş, panel eğim açısı, yönü ve sistem konfigürasyonunun performansa etkisi incelenmiştir (Yiğit, 2023). Akyazı ve ark. (2024) tarafından Türkiye'nin yedi bölgesinden yıllık global radyasyon değerlerine en yakın seçilen illerde 24 MW gücünde şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler modellenmiş ve PVsyst programı ile simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, Güneydoğu Anadolu Bölgesi en yüksek yıllık küresel radyasyon değerini, İç Anadolu Bölgesi ise en yüksek performansı göstermiştir. Konya'da kurulması düşünülen bir güneş enerjisi santrali için yapılan modelleme ve simülasyon çalışmasında, yapılan maliyet hesabına göre GES maliyeti yaklaşık 963000 \$, amorti süresi 4,79 yıl bulunmuştur (Dinçer, 2025).

Ilıman iklimlere sahip bazı Avrupa ülkelerinde yapılan saha temelli çalışmalar da sistem karşılaştırmalarına olanak tanımaktadır. Örneğin, yapılan bir çalışmada Hollanda, Belçika, Fransa ve İtalya'dan alınan verilerle çatı tipi PV sistemlerinin yıllık performans oranları analiz edilmiş; monokristal panellerde PR %74,6, polikristal panellerde %73,8 bulunmuştur (Gulkowski ve Krawczak, 2024). Benzer biçimde, Kuzey İtalya'da bulunan iki şebekeye bağlı PV sisteminin dış ortam performansı ölçülerek çalışma koşullarına göre verimlilik değerlendirilmesi yapılmıştır (Sánchez-Jiménez ve ark., 2025).

Literatürde, PV sistemlerin yerel fizibilite çalışmalarının yanı sıra, farklı uygulama alanları da incelenmiştir. Örneğin, bina ölçeğinde çatı tipi PV sistemlerinin simülasyonları (Saputri ve ark., 2024), kırsal alanlarda su pompalama sistemlerine yönelik teknik analizler (Chandel ve ark., 2015) ve PV sistem optimizasyonunda yapay zeka tabanlı yaklaşımlar (Mellit ve Kalogirou, 2008) bu kapsamda öne çıkan çalışmalardır.

Literatürde PV sistemlerin teknik performansının yanı sıra ekonomik uygulanabilirliğinin de yatırım kararlarında belirleyici bir unsur olduğu vurgulanmaktadır. Yatırım maliyeti, geri ödeme süresi ve seviyelendirilmiş elektrik maliyeti (Levelized Cost of Electricity, LCOE) gibi göstergeler, sistemlerin uzun vadeli fizibilitesini ortaya koymada kritik rol oynamaktadır (Pan ve ark., 2022; IEA, 2023).

Bu çalışma, Bursa ili Osmangazi ilçesinde faaliyet gösteren bir tekstil kimyasalları üretim tesisinin çatı alanına yerleştirilmesi planlanan 125 kWp kapasiteli fotovoltaik güneş enerjisi sisteminin, PVsyst yazılımı kullanılarak simülasyon temelli teknik ve çevresel değerlendirmesini sunmaktadır. Literatürde PV sistemlerine ilişkin çok sayıda uygulama çalışması bulunmasına rağmen, Bursa gibi orta düzeyde ışınım potansiyeline sahip sanayi bölgelerinde, gerçek bir endüstriyel tesis verisi üzerinden bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalar sınırlıdır. Bu yönüyle çalışma, hem teknik fizibiliteyi ortaya koymakta, hem de CO₂ emisyon azaltımı üzerinden çevresel kazanımları somutlaştırarak literatüre yerel ölçekli bir katkı sunmaktadır. Ayrıca, bu çalışma 0° eğim açısında azimut yöneliminin enerji üretimine etkisinin bulunmadığını sahaya özgü verilerle ortaya koyması ve Bursa gibi orta ışınım potansiyeline sahip bir bölgede sanayi

ölçeğinde yüksek bir performans oranı elde edilmesini raporlaması açısından literatürdeki benzer çalışmalar arasında öne çıkmaktadır.

2. MATERYAL VE METOT

Bursa Demirtaş Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan tekstil kimyasalları üretim tesisi, 2004 yılından bu yana faaliyet göstermektedir. Toplam 15 çalışanı bulunan tesis, 4.000 m²'lik bir alanda tekstil kimyasalları üretmekte; ayrıca boya, kimyasal, enzim, optik ve silikon ithalatı gerçekleştirmektedir. İlk yıllarında tekstil yardımcı kimyasalları satışıyla sektöre giriş yapan tesis, zamanla Uzakdoğu ülkelerinden mümessillikler alarak tekstil boyalarının ithalatı ve pazarlamasını üstlenmiştir. Daha sonraki süreçte ise Almanya merkezli bir firmanın tekstil yardımcı kimyasalları üretimi ve pazarlamasını yürütmüştür. Yıllık 960 ton üretim kapasitesine sahip olan tesise ait Google Earth görüntüsü Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1:
Tesisin Google Earth görünümü (Google Earth, 2025)

Enerji verimliliği ve sürdürülebilir üretim hedefleri doğrultusunda, tesiste güneş enerjisi sistemleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına yönelik fizibilite çalışmaları başlatılmıştır. Bu kapsamda, fotovoltaik sistemlerin teknik ve ekonomik değerlendirmesi büyük önem taşımaktadır. Bu tür analizlerin gerçekleştirilmesinde ise PVsyst yazılımı ön plana çıkmaktadır.

PV sistemlerin performans analizinde yapay zeka temelli modelleme teknikleri yaygınlaşmakla birlikte, PVsyst yazılımı fiziksel temelli yapısı, geniş kabul görmüş veri tabanı ve saha koşullarını yansıtmadaki başarısı nedeniyle birçok çalışmada tercih edilmektedir (Mellit ve Kalogirou, 2008). PVsyst, fotovoltaik sistemlerin kurulumu öncesi üretim verilerinin analiz edilmesi, boyutlandırılması ve simülasyonla değerlendirilmesi amacıyla kullanılan, C diliyle geliştirilmiş bir yazılımdır. PVsyst, küresel ölçekte PV sistem tasarımı ve simülasyonu alanında yaygın olarak tercih edilen bir araç haline gelmiştir (PVsyst, 2025a).

PVsyst, şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız fotovoltaik enerji sistemleri için paneller, invertörler ve kurulum bölgesine ait ışınım ile meteorolojik verileri değerlendirerek detaylı simülasyon raporları sunar. Simülasyon çalışmaları, PVsyst 7.2 yazılımında yıllık bazda gerçekleştirilmiş ve aylık enerji üretim değerleri detaylı şekilde analiz edilmiştir. PVsyst ile elde edilen aylık üretim değerleri, tesisin geçmiş dönem elektrik tüketimiyle karşılaştırılarak sistemin

yıllık enerji ihtiyacını karşılama oranı hesaplanmıştır. Bu özellik sayesinde yatırımcılar, sistemin enerji üretim potansiyeli, verimliliği ve kayıpları hakkında ayrıntılı bilgilere ulaşabilir. Ayrıca, yazılımın 3D modelleme özelliği sayesinde PV sistemine düşen gölgeler simüle edilebilir ve bu gölgelerin sistem performansı üzerindeki etkileri ile oluşabilecek enerji kayıpları hesaplanabilir. Gölgeleme analizleri kapsamında, sistemin kurulu olduğu çatı alanı için yıl boyunca farklı saatlerde oluşabilecek gölge etkileri PVsyst'in 3D modelleme aracı ile değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda yıllık gölgeleme kaybı %4,4 olarak hesaplanmıştır (PVsyst, 2025b).

Güneş enerjisi sistemi, tesisin ana üretim binasının çatı yüzeyine yerleştirilmiş olup, toplam kurulum alanı yaklaşık 547 m²'dir. Paneller, gölgeleme etkisini minimize edecek şekilde 0° eğim açısıyla ve -160° azimut yönünde konumlandırılmıştır. Bu tercih, çatının mevcut eğimi, rüzgâr yükü sınırları ve yapısal kısıtlar dikkate alınarak yapılmıştır. Ayrıca, literatürde 0° eğim açısının düz çatı uygulamalarında deneysel olarak incelendiği ve bazı çalışmalarda eğim açısı değişiminin yıllık üretim üzerindeki etkisinin sınırlı kaldığı bildirilmiştir (Osadcuks ve ark., 2025).

Kurulumu planlanan fotovoltaik sistemde, her biri 550 W gücünde monokristal yapıda toplam 227 adet güneş paneli kullanılmıştır. Paneller yüksek verimlilik oranına (yaklaşık %21–22) sahip olup, özellikle düşük ışınım koşullarında dahi üretkenlik sağlayacak teknik özelliklerle donatılmıştır. Sistem, 100 kW gücünde üç fazlı, yüksek verimli bir inverter (örneğin Fronius Symo veya eşdeğeri) ile şebekeye entegre edilmiştir. İnverter, maksimum güç noktası izleyicisi (MPPT) özelliği sayesinde panel çıkışlarını optimize ederek enerji dönüşüm kayıplarını minimize etmektedir. Kurulumla ilişkin tüm ekipmanlar, PVsyst yazılımında modelleme sırasında tanımlanmış ve sistem konfigürasyonu buna göre oluşturulmuştur. Bu sistem konfigürasyonunda panel yerleşimi, invertör bağlantıları ve gölgeleme etkileri gibi fiziksel detaylar da göz önünde bulundurulmuş, sistem bileşenleri üretici verilerine göre tanımlanmıştır. Simülasyon analizlerinde meteorolojik veriler PVsyst yazılımı içinde yer alan Meteonorm 7.2 veri tabanından alınmıştır. İlgili veri seti, proje sahasına en yakın ölçüm istasyonlarından türetilmiş küresel yatay ışınım ve sıcaklık verilerini içermektedir.

Fotovoltaik sistem performansının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan parametrelerden biri performans oranı (Performance Ratio, PR) olup, IEC 61724-1 standardında tanımlandığı şekliyle, sistemin net enerji çıktısının (E, kWsa) referans enerji üretimine (P_o·H, kWsa) oranı olarak ifade edilir (1) (Marion ve ark., 2005; Dierauf ve ark., 2013; Nordmann ve ark., 2014).

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} = \frac{E}{P_o \cdot H} \quad (1)$$

Burada nihai üretim (final yield, Y_f) sistemin net enerji çıktısını kurulu güce bölerek (kWsa/kWp), referans üretim (reference yield, Y_r) ise yatay düzlemdeki toplam ışınımın standart ışınım değerine (1 kW/m²) bölünmesiyle elde edilir (kWsa/kWp).

PR değeri, sistem kayıplarını (sıcaklık, gölgeleme, inverter verimsizliği vb.) yansıttığından farklı iklim koşullarındaki tesislerin verimlilik karşılaştırmalarında kullanılabilir.

Bu çalışmada yalnızca ilk yatırım maliyeti dikkate alınmış, bakım ve işletme maliyetleri ise hesaplamalara dahil edilmemiştir. Ancak, literatürde, ticari ve sanayi ölçeğindeki PV sistemlerde bakım ve işletme maliyetlerinin genellikle 20-25 USD/kW·yıl aralığında olduğu bildirilmektedir (NREL, 2024).

Bu nedenle, sistem bileşenlerine ilişkin teknik verilerin detaylı biçimde sunulması ve PVsyst yazılımı aracılığıyla yapılan analizlerin doğruluğu, bu çalışmanın hem sürdürülebilir enerji planlamasına katkı sunması, hem de benzer sanayi tesisleri için uygulanabilirliğinin ortaya konması açısından büyük önem taşımaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada incelenen tesisin 2024 yılına ait elektrik tüketim verileri Tablo 1’de sunulmuştur.

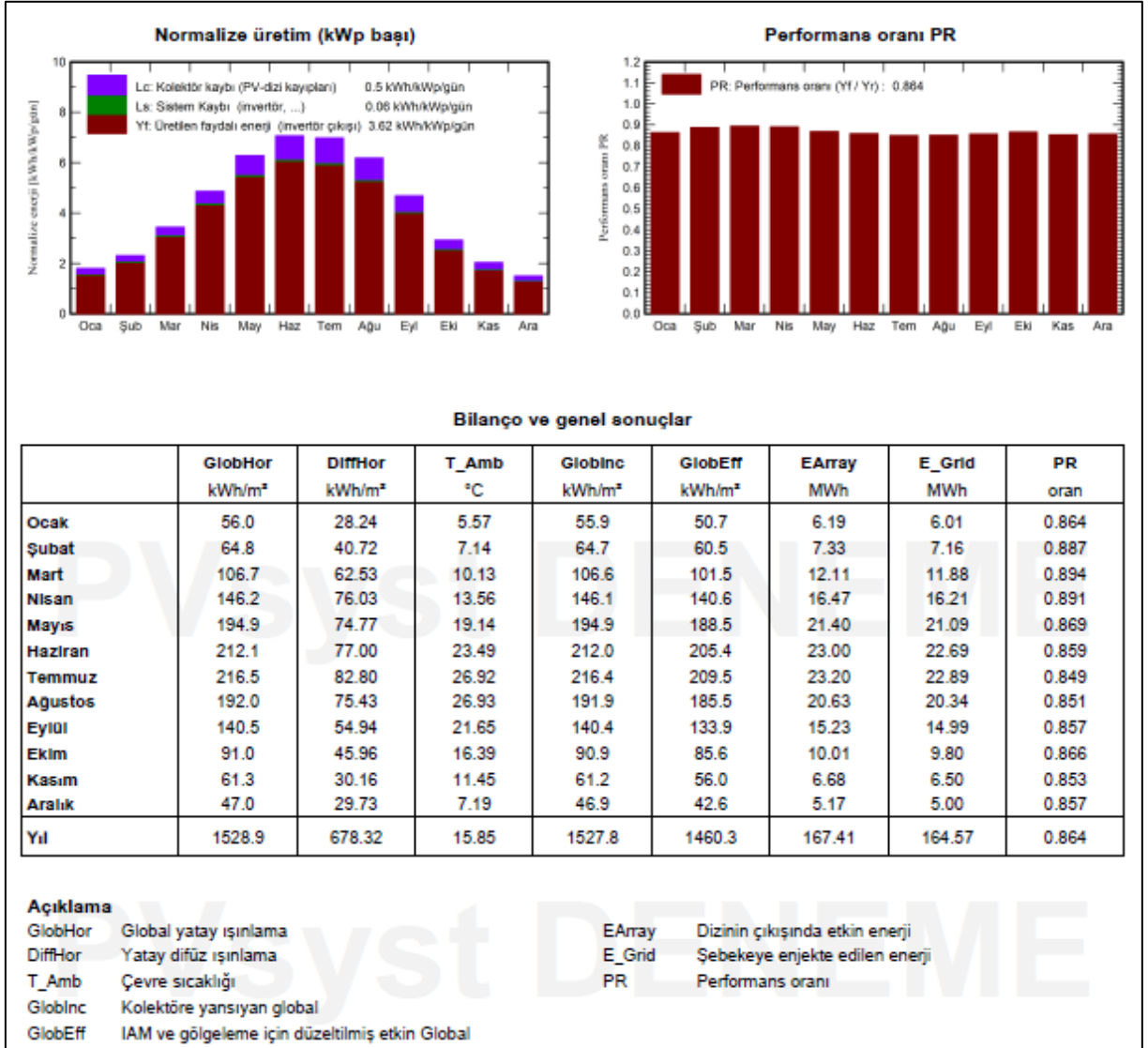
Tablo 1. Çalışma kapsamında incelenen tesisin 2024 yılı elektrik tüketim değerleri

Aylar	Elektrik tüketimi (kWs)	Ortalama elektrik tüketimi (kWs/gün)	Tutar (TL)
Ocak	16966,9	652,57	57070,87
Şubat	19252,3	740,47	65934,04
Mart	17255,6	663,67	59300,11
Nisan	14565,8	560,22	54743,82
Mayıs	4414,2	169,77	20414,39
Haziran	10992,3	422,78	39142,78
Temmuz	8908,5	342,63	37757,45
Ağustos	12064,4	464,01	51843,32
Eylül	10364,7	398,64	43008,44
Ekim	9985,9	384,07	38954,22
Kasım	10437,7	401,45	39143,60
Aralık	15811,5	608,13	62614,52
	Toplam = 151019,8	Ort = 5808,453846	Toplam = 569927,56

Tablo 1 incelendiğinde, 2024 yılı içerisinde en yüksek elektrik tüketiminin Şubat ayında 19.252,3 kWs, en düşük tüketimin ise Mayıs ayında 4.414,2 kWs olarak gerçekleştiği görülmektedir. Yıl boyunca toplam 151.019,8 kWs elektrik enerjisi tüketilmiş ve bu tüketim için 569.927,56 TL tutarında ödeme yapılmıştır. Bu veriler doğrultusunda, tesisin enerji ihtiyacının önemli bir kısmının PV sistem ile karşılanması, enerji maliyetlerinin azaltılması ve sürdürülebilir üretim hedefleri açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

Şebekeye entegre PV sistemler, üretilen enerjiyi en yakın dağıtım şebekesine bağlayarak iletim ve dağıtım kayıplarını minimize etme avantajı sunmaktadır. Bu tür sistemlerde, elektrik enerjisi üretildiği anda ve noktada, herhangi bir ek depolama ünitesine (akü, batarya vb.) ihtiyaç duyulmaksızın doğrudan şebekeye aktarılmakta ve anlık olarak tüketilebilmektedir. Dolayısıyla, şebekeye bağlı sistemler enerji verimliliğinin artırılması açısından önemli bir alternatif oluşturmaktadır (Arıcı ve İskender, 2020).

Şebekeye entegre güneş enerjisi santrallerinde sistem performansının değerlendirilmesinde; panel dizilerine ait çıkış gerilimi ve akımı, toplam elektrik üretimi, öz tüketimde kullanılan enerji miktarı, performans oranı, şebekeye aktarılan ve şebekeden temin edilen enerji miktarları ile gölgelenme, invertör ve kablo kaynaklı kayıplar temel parametreler olarak dikkate alınmaktadır (Özcan ve İzgi, 2020). Şekil 2’de yer alan simülasyon sonuçlarına göre, 0° eğim ve -160° Azimut değeri için sistemin yıllık üretim kapasitesi yaklaşık 167,41 MWh olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuca göre fabrikanın elektrik ihtiyacının %108,97’sini PV sistem tarafından karşılanacaktır.

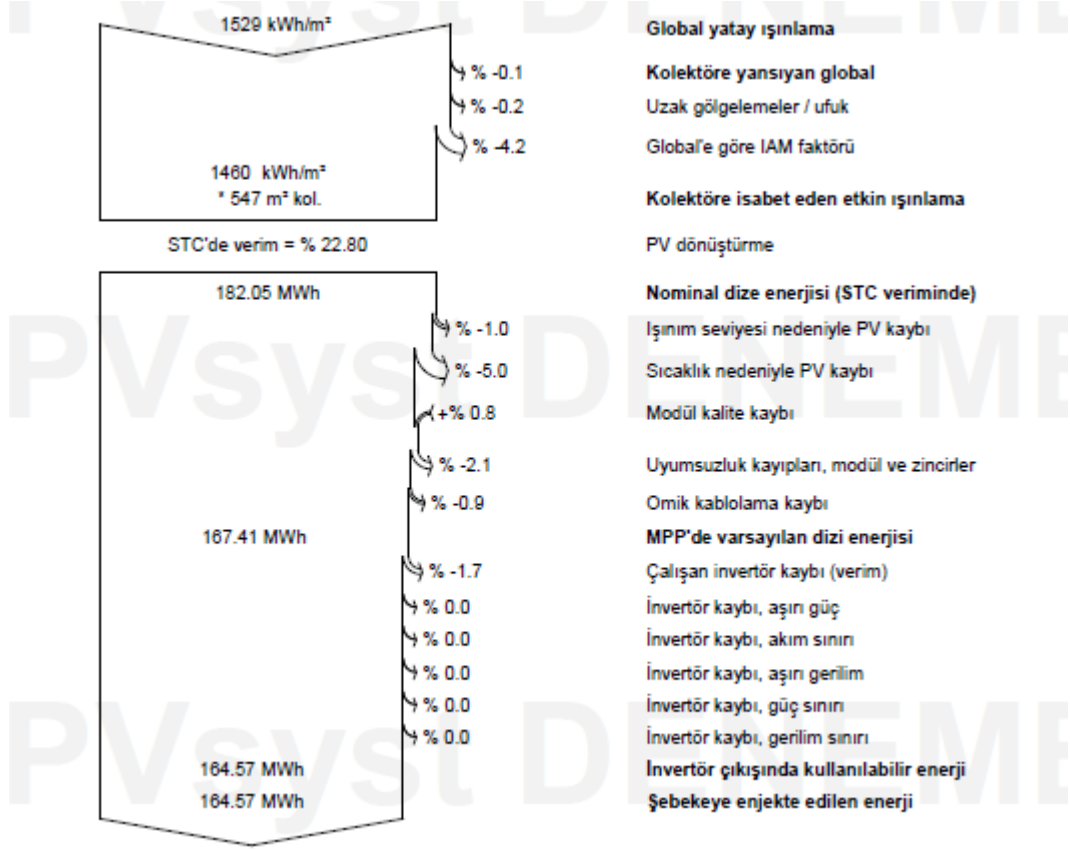


Şekil 2:
Simülasyon sonuçları

Simülasyon verileri incelendiğinde, tasarlanan PV sistemin toplam nominal kurulu gücünün 125 kWp olduğu belirlenmiştir. Analizler, ortam sıcaklığının arttığı dönemlerde enerji üretim miktarının da arttığını, ancak özellikle yaz aylarında sıcaklık kaynaklı PV hücre verimliliğindeki düşüşün sistem performansını olumsuz etkilediğini ortaya koymuştur. Daha düşük sıcaklık değerlerinin görüldüğü kış aylarında PV hücrelerinin daha verimli çalıştığı ve buna bağlı olarak sistemin performans oranında artış yaşandığı tespit edilmiştir. Yıllık ortalama performans oranı %86,45 olarak hesaplanmış olup, en yüksek performans oranı %89,4 ile Mart ayında gerçekleşmiştir.

Proje sahasına ilişkin yıllık yatay düzlem global ışınlam verileri değerlendirildiğinde, Temmuz ayında 216,5 kWsa/m² ile en yüksek, Aralık ayında ise 47,0 kWsa/m² ile en düşük aylık toplam ışınlam değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, şebekeye en yüksek elektrik enerjisi iletimi, ışınlamın maksimum düzeyde gerçekleştiği Temmuz ayında 22,89 MWh olarak gerçekleşmiştir. Buna karşılık, ışınlamın en düşük seviyede olduğu Aralık ayında şebekeye iletilen

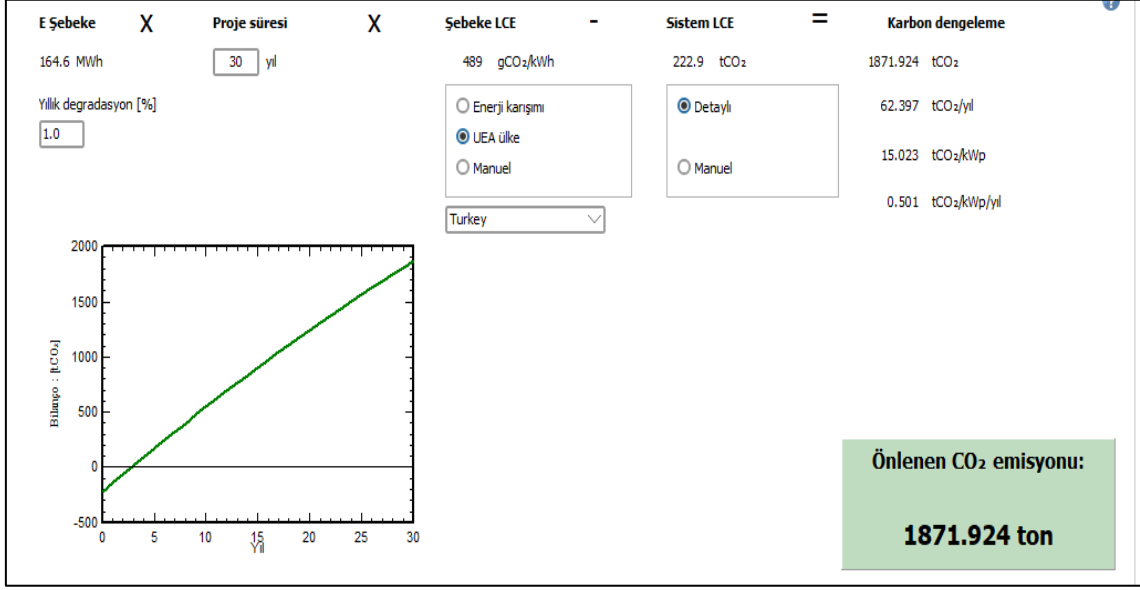
elektrik enerjisi miktarı 5,00 MWsa ile en düşük düzeyde kalmıştır. Şekil 3'te sistemin yıl boyunca karşılaştığı kayıplar ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 3:
Yıl boyu kayıplar diyagramı

Şekil 3'de yer alan verilere göre, seçilen proje konumu için yatay düzlemde ölçülen yıllık global ışınım miktarı 1529 kWh/m² olarak tespit edilmiştir. Fotovoltaik paneller, binanın çatısına 0° eğim açısıyla monte edilmiş olup, bu kurulum biçimi panel yüzeyine gelen ışınım miktarında herhangi bir azalma ya da artışa neden olmamıştır. Toplam panel yüzey alanı 547 m² olarak belirlenmiş ve standart test koşulları altında sistem verimi %22,80 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4'te PVsyst simülasyon programından elde edilen CO₂ emisyon bilançosu sonuçları verilmiştir. Bu analiz, sistemin çevresel katkısını sayısal olarak ortaya koymaktadır.



Şekil 4:
CO₂ emisyon bilançosu

Simülasyon bulguları, belirlenen yıllık üretim ve PR değerlerinin saha koşulları ve kayıp bileşenleri ile tutarlı olduğunu göstermektedir. Bu durum, PV sistemlerin yalnızca ekonomik değil, aynı zamanda çevresel açıdan da sürdürülebilir ve iklim değişikliğiyle mücadelede etkili bir enerji çözümü olduğunu ortaya koymaktadır.

Program aracılığıyla, çatı üzerine 227 adet 550 W kapasiteli panel yerleştirildiğinde, yıllık yaklaşık 164,57 MWsa elektrik üretileceği öngörülmektedir. Bu değer, mevsimsel ve iklimsel değişimlere bağlı olarak farklılık gösterebilir. Kurulacak sistem sayesinde tesisin yıllık elektrik ihtiyacının yaklaşık %108,97'si PV sistemi tarafından karşılanabilecektir. Söz konusu sistemin maliyeti ise program tarafından yaklaşık 32797,58 USD olarak hesaplanmıştır. Fabrika, elektrik enerjisini organize sanayi bölgesinden temin etmekte olup, 2024 yılı itibarıyla elektriğin birim fiyatı 0,06 USD olarak belirlenmiştir.

Basit geri ödeme süresi yöntemi ile hesapladığımızda;

$$\text{Geri Ödeme Süresi} = \frac{\text{Toplam Yatırım}}{\text{Yıllık Fayda}} \quad (2)$$

$$x = \frac{32797,58}{9874,2} = 3,32 \text{ yıl}$$

Bu hesaplama göre yatırımın kendisini 3,32 yıl gibi bir sürede amorti edeceği öngörülmüştür (2).

Literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, bu çalışmada elde edilen %86,45'lik performans oranı oldukça yüksek bir verimliliğe işaret etmektedir. Örneğin, Yiğit (2023), 1 MW kapasiteli bir santral için %80'lik ortalama performans oranı hesaplamış; Akyazı ve ark. (2024) ise Güneydoğu Anadolu'nun yüksek ışınım potansiyelini vurgularken, İç Anadolu'nun sistem verimi açısından daha avantajlı olduğunu belirtmiştir. Bursa'da ölçülen 1529 kWsa/m²'lik yıllık ışınım değeri bu bölgelerle karşılaştırıldığında nispeten düşük kalmakla birlikte, elde edilen yüksek performans oranı bu dezavantajı dengelemektedir. Benzer şekilde, Tuğcu (2023) tarafından Kütahya Tavşanlı Yerleşkesi için yapılan çalışmada, %18,48 verimli panellerin 36°

eğim açısıyla yerleştirilmesi sonucunda yıllık yaklaşık 291,1 MWsa üretim sağlanabileceği ve panel eğimiyle ışınımın %12,5 oranında artırılacağı belirtilmiştir. Bu veriler, sistem tasarımının ışınım dışında birçok parametreye bağlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Dinçer (2025) tarafından yapılan çalışmada 4,79 yıl, Çetinkaya ve ark. (2022) tarafından ise 8 yıl olarak hesaplanan geri ödeme süreleri dikkate alındığında, bu çalışmada doğrudan bir maliyet analizi yapılmamış olsa da, enerji üretim verileri ve sistem performansı dikkate alındığında ekonomik uygulanabilirliğin literatürde bildirilen geri ödeme süreleriyle benzer düzeyde olabileceği değerlendirilmektedir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Bursa'nın Osmangazi ilçesinde faaliyet gösteren bir tekstil kimyasalları üretim tesisinin elektrik ihtiyacının çatı tipi PV paneller aracılığıyla karşılanabilirliği, PVsyst 7.2 simülasyon programı kullanılarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, 125 kWp kurulu güce sahip sistem ile yıllık yaklaşık 164,57 MWsa elektrik üretilebileceği belirlenmiştir. Sistemin yıllık ortalama performans oranı %86,45 olarak hesaplanmış, özellikle Mart ayında %89,4'e ulaşarak yüksek verimlilik göstermiştir.

Simülasyon verileri, yaz aylarında artan sıcaklıkların PV hücre verimliliğini olumsuz etkilediğini, buna karşın düşük sıcaklıklarda sistem veriminin arttığını göstermektedir. Proje sahasına ait yıllık yatay düzlem global ışınım değeri 1529 kWsa/m² olarak belirlenmiştir. Bu değer Bursa gibi ışınım potansiyeli nispeten düşük bölgelerde dahi PV sistemlerinin etkin şekilde çalışabileceğini ortaya koymaktadır.

Yapılan analizler, PV sistemin yıllık yaklaşık 164,57 MWsa elektrik üretme kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu değer, tesisin yıllık elektrik ihtiyacının %108,97'sini karşılayacak seviyededir. Bu durum, enerji maliyetlerinde ciddi bir azalma sağlarken, tesisin karbon ayak izinin düşürülmesine de katkı sunmaktadır. PVsyst simülasyonuna göre sistemin ömrü boyunca yaklaşık 1.872 ton CO₂ eşdeğeri sera gazı emisyonunu engellemesi beklenmektedir.

Bu sonuçlar, çatı tipi PV sistemlerin sanayi ölçeğinde hem teknik, hem de çevresel açıdan uygulanabilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Çalışma, hem enerji maliyetlerinin düşürülmesi, hem de çevresel sürdürülebilirliğin desteklenmesi açısından önemli bir örnek oluşturmaktadır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu çalışmanın yazarları olarak, herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile çıkar çatışması bulunmadığını onaylarız.

YAZAR KATKISI

Melike YALILI KILIÇ, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, makale taslağının oluşturulması, fikrinsel içeriğin eleştirel incelemesi ile son onay ve tam sorumluluk kısımlarında birincil düzeyde katkı sağlamış; Merve KURTARAN ise veri toplama, veri analizi ve yorumlama ile son onay ve tam sorumluluk kısımlarında destek vererek katkıda bulunmuştur.

KAYNAKLAR

1. Akyazı, Ö., Başlık, Ş., Khidirzade, K. ve Çavdar, B. (2024). Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin PVsyst ile analizi, *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 14(3), 1486-1502, doi:10.31466/kfbd.1478610
2. Arıcı, N. ve İskender, A. (2020). Fotovoltaik güneş santrallerinde şebeke bağlantı sorunları ve çözümleri, *Politeknik Dergisi*, 23(1), 215-222, doi:10.2339/politeknik.644820
3. Chandel, S.S., Naik, M.N. ve Chandel, R. (2015). Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1084-1099, doi:10.1016/j.rser.2015.04.083
4. CW Enerji, (2025). GES projelerimiz: Konya Seydişehir 1,1 MWp ve Gaziantep Şehitkamil 5.910 kWp. <https://cw-enerji.com/tr/ges-projelerimiz> (Erişim tarihi: 13.08.2025).
5. Çetinkaya, O., Pürlü, M. ve Emre Türkay, B. (2022). PVsyst ve Homer kullanılarak şebekeye bağlı mikro şebeke tasarımı, *CIGRE Türkiye Güç Sistemleri Konferansı Bildirileri*, Ankara.
6. Dierauf, T., Growitz, A., Kurtz, S., Cruz, J.L.B., Riley, E. ve Hansen, C. (2013). Weather-corrected performance ratio, *National Renewable Energy Laboratory*, NREL/TP-5200-57991. <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/57991.pdf>
7. Dinçer, F. (2025). Şebeke bağlantılı güneş enerjisi santrali yatırımı için modelleme ve simülasyon analizi: Iğın/Konya örneği, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(1), 112-128.
8. DOE, (2023). Solar Energy Technologies Office, <https://www.energy.gov/solar-office>
9. EİGM, (2023). Türkiye güneş enerjisi potansiyel atlası (GEPA), <https://www.eigm.gov.tr>
10. EPDK, (2022). Elektrik piyasasında lisanssız elektrik üretim yönetmeliğinde değişiklik yapılmasına dair yönetmelik, Resmi Gazete, 11 Ağustos 2022, Sayı: 31920.
11. Fraunhofer ISE (2023). Photovoltaics report. Fraunhofer institute for solar energy systems ISE. <https://www.ise.fraunhofer.de>
12. Google Earth, (2025). <https://earth.google.com/>
13. Gulkowski, S. ve Krawczak, E. (2024). Long-term energy yield analysis of the rooftop pv system in climate conditions of Poland, *Sustainability*, 16, 3348, doi:10.3390/su16083348
14. Green, M.A. (1982). Solar cells: operating principles, technology, and system applications, Prentice-Hall, Inc.
15. IEA, (2022). World Energy Outlook 2022. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
16. IEA, (2023). Renewable Energy Market Update – Outlook for 2023 and 2024. International Energy Agency. Erişim: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-june-2023>
17. IPCC, (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.
18. Jacobson, M.Z. (2020). 100% Clean, renewable energy and storage for everything, Cambridge University Press, doi:10.1017/9781108786713
19. Keskin, E. (2012). Türkiye iklim koşullarında fotovoltaik güç sistemlerinin tasarımı ve maliyet analizi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

20. Lewis, N.S. ve Nocera, D.G. (2006). Powering the planet: chemical challenges in solar energy utilization, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(21), 15729-15735, doi:10.1073/pnas.0603395103.
21. Li, J., Wang, C., Guo, J., Xin, Y., Zhang, N., Liu, X. ve Feng, K. (2024). Promoting sustainable development goals by optimizing city-level pv deployment in China, *Environmental Science and Technology*, 58(12), 5196-5209, doi:10.1021/acs.est.3c09263
22. Marion, B., Adelstein, J., Boyle, K., Hayden, H., Hammond, B., Fletcher, T., Canada, B., Narang, D., Shugar, D., Wenger, H., Kimber, A., Mitchell, L., Rich, G. ve Townsend, T. (2005). Performance parameters for grid-connected pv systems, *National Renewable Energy Laboratory*, NREL/TP-520-37358. Erişim adresi: <https://www.nrel.gov/docs/fy05osti/37358.pdf>
23. Mellit, A. ve Kalogirou, S.A. (2008). Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review, *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 574-632, doi:10.1016/j.peccs.2008.01.001
24. NREL, (2024). Utility-Scale PV: operation & maintenance (O&M) Cost. Golden, CO: NREL. Erişim adresi: https://atb.nrel.gov/electricity/2024/utility-scale_pv
25. Nordmann, T., Clavadetscher, L. Van Sark, G.J.H.M. ve Green, M. (2014). Analysis of long-term performance of pv systems. IEA photovoltaic power systems programme, Report IEA-PVPS T13-01:2014. Erişim adresi: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA_PVPS_T13_ST1_Final_02_2015-2.pdf
26. Osadčuks, V., Berjoza, D., Laceklis-Bertmanis, J. ve Jurgena, I. (2025). A methodological framework for studying the tilt angle of solar photovoltaic panels, *Energies*, 18, 3487, doi:10.3390/en18133487
27. Özcan, Ö. ve İzgi, E. (2020). Şebekeye bağlı fotovoltaik çatı sisteminin karşılaştırmalı performans analizi, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(3), 127-140, doi:10.17780/ksujes.726319
28. TEİAŞ, (2022). Türkiye elektrik iletim sistemi 2022 raporu. <https://www.teias.gov.tr>
29. Tuğcu, A. (2023). PVSYSYNT simülasyon aracı kullanılarak Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Tavşanlı Yerleşkesi şebeke bağlantılı güneş enerjisi santralının tasarımı ve ekonomik Analizi. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 397-417, doi:10.34186/klujes.1251085
30. Pan, D., Bai, Y., Chang, M., Wang, X. ve Wang, W. (2022). The technical and economic potential of urban rooftop photovoltaic systems for power generation in Guangzhou, China, *Energy and Buildings*, 277, 112591, doi:10.1016/j.enbuild.2022.112591
31. PIB, (2025). India's renewable energy capacity Reaches 220.10 GW as of March 31, 2025, reflecting robust progress toward the target of achieving 500 GW of non-fossil fuel-based capacity by 2030 <https://pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2001234>
32. PVsyst, (2025a). Software. <http://www.pvsyst.com/en/software> Erişim tarihi: 14.08.2025
33. PVsyst, (2025b). PVsyst. Scientific Publication. <https://www.pvsyst.com/scientific-publication> Erişim tarihi: 14.08.2025
34. Sánchez-Jiménez, J.L., Jiménez-Castillo, G., Rus-Casas, C., Martínez-Calahorra, A.J. ve Muñoz-Rodríguez, F.J. (2025). Performance evaluation of photovoltaic self-consumption systems installed on industrial rooftops under continental Mediterranean climate conditions with multi-string inverter topology, *Energy Reports*, 14, 1020-1042, doi:10.1016/j.egy.2025.06.047

35. Saputri, F.R., Robert, N. ve Akbar, A.M. (2024). Assessment of the viability of photovoltaic system implementation on the New Media Tower of Universitas Multimedia Nusantara using PVsyst software: A feasibility study, *PLOS ONE*, 6, 1-14, doi:10.1371/journal.pone.0314922
36. Wirth, H. (2022). Recent facts about photovoltaics in Germany, *Fraunhofer ISE*, <https://www.ise.fraunhofer.de>
37. Yiğit, F. (2023). Şebekeye bağlı 1 MW güneş enerji santralinin PVsyst ile simülasyonu ve performans parametrelerinin değerlendirilmesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya.

